第40卷 第7期
2023年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

# 乌拉山废弃矿山生态恢复的近自然植被空间配置模式

张泽宇[1]， 吴晓静[2]， 梁一鹏[1]， 张晓霞[3]， 查同刚[1,4]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 北京市八达岭林场，北京 102112；3. 中建一局集团第三建筑有限公司，北京 100161；4. 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

**摘 要：**本研究着眼于废弃矿山立地类型与植被群落特征关系的研究视角，以近自然修复理论为基础探究其植被群落空间配置，为废弃矿区生态修复过程中植被恢复提供理论依据和参考。研究区位于内蒙古乌拉山废弃矿山，采用主成分分析、相关性分析和聚类分析的方法划分立地类型，探究不同立地类型下植物群落特征，从而得到近自然植被恢复的最佳空间配置比例。结果表明：坡度、坡位和土壤硬度为主导因子并据此将该区域划分为9个立地类型。其中，缓坡坡中中质土立地类型和斜坡坡中中质土立地类型在生物量、植被盖度、Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数上均大于其他立地类型。就植被配置模式而言，对于生境较差的立地类型如缓坡坡下软质土立地类型，建议配置草本模式（配置比例为多年生草本：一年生草本=6：4），对于其他立地条件较好区域，建议配置灌草模式。

**关键词：**废弃矿山；立地类型；主成分分析；聚类分析；植物群落特征

近自然修复技术是以包含生态位原理、生物多样性理论、生态适应性理论等原理[1]在内的恢复生态学基本原理为基础[2]，以自然生态系统的结构和演替机制为参考，强调生态系统自我恢复能力和调节力，最小化人为干预[3]，以乡土植物为主要对象，促进植被向演替后期植被群落恢复[4]，最终达到生态系统自身良性循环的生态修复技术。近自然修复不仅具有修复效果的持续性、稳定性、系统性等优势，还具有适用范围的广泛性、低成本的特点，从长远来看，修复矿山废弃地，近自然修复要优于人工修复[5-6]。

在当前干旱半干旱区的矿山生态修复过程中，普遍存在物种单一、乡土物种较少、物种多样性低[7-8]、群落稳定性较差[9]及缺少对区域植被多样性和地形分异特征的充分权衡等问题。对于退化生态系统，近自然恢复不仅能提高生产力，改善生态系统多种功能和服务，如提高物种多样性[10]，还可缩短生态恢复过程中生态系统演替的周期[11]。为实现废弃矿山的生态系统近自然修复，参照自然构建一个合理稳定、具有自我更新演替能力的近自然植被配置是十分有必要[12-13]。因此，本文以位于半干旱区的乌拉山废弃矿山为研究对象，立足于立地条件与群落结构关系的角度，对其毗邻区立地条件与植被空间分布格局及其关系进行调查分析，研究近自然恢复植被空间配置模式，以期为受损生态系统植被恢复的空间配置模式提供参照，进而为西北半干旱区矿山近自然修复提供可借鉴的经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区乌梁素海流域的乌拉山（40°47′～41°03′N，108°43′～108°57′E），主要有煤、铁、金、铜等矿床，矿点101处，乌拉山北麓废弃铁矿作为典型废弃矿区，面积约4.5 $km^2$，该地区处于温带干旱的西部季风气候区，平均降水量200~

**收稿日期：**2022-08-22； **修订日期：**2023-01-19
**基金项目：**中建股份科技研发计划项目（CSCEC-2020-Z-5）
**作者简介：**张泽宇（1997-），女，博士研究生，主要从事土壤退化与生态修复研究. E-mail: Zhangzeyu1997@bjfu.edu.cn
**通讯作者：**查同刚. E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

250 mm[14],多集中在夏季,年蒸发潜力2167~2500 mm,远远大于降水量。草本植物主要以蒙古韭(*Allium mongolicum*)、中华草沙蚕(*Tripogon chinensis*)和骆驼蓬(*Peganum harmala*)为主,灌木植物主要以刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)和狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)为主。土壤主要以砂粒为主,其含量占70%以上。土壤类型以灰褐土和栗钙土为主,主要受风、水复合侵蚀影响,生态环境脆弱。

乌拉山是乌梁素海流域"山水林田湖草"生态要素中"山"的部分,近年来面临着草场植被严重退化、草场沙化面积不断扩大、水环境恶化、土壤沙化、盐碱化及矿山过度开发等诸多问题。研究区内存在大量废弃矿山,目前生态恢复主要采用"地形整治+表土覆盖+草种飞播"的方法,但地形整治后表土裸露,水土流失风险极大,水土流失十分严重[15]。区域内植物共有约75科,278属,491种[14],具有较丰富的物种资源,但矿山生态修复中局限于苜蓿、披碱草等抗逆性强又易获得的物种,种群相对单一,物种多样性较低,群落稳定性较差[11]。同时,受到研究区降雨条件本身的限制和严重的风力侵蚀影响,乌拉山废弃矿区植被恢复状况较差。

### 1.2 样地布设

2020年7月,采用典型样地调查方法调查废弃矿区毗邻立地条件相近的自然草地,布设了36个10 m×10 m的样方,因调查范围内不含乔木,故每个样地内布设3个灌草小样方(2 m×2 m)。在每一个灌草小样方内,测其植被种类、盖度、高度及株数,取植被的地上部分带回实验室烘干称重,计算生物量。由于研究区样地相对集中,海拔相差不大,变化幅度对光、温、水、气、热等生态因子的影响较小,故本研究调查指标为坡度($X_1$)、坡位($X_2$)、坡向($X_3$)、速效磷含量($X_4$)、全磷含量($X_5$)、速效钾含量($X_6$)、土壤硬度($X_7$)、土层厚度($X_8$)和土壤质地($X_9$)9个指标,其中土壤质地在数值上用砾石(粒径≥2 mm)的含量代替,具体因子类目划分及赋值见表1。

### 1.3 土壤采样与测定

每个样地的灌草小样方内,采用对角线法选三点采集0~20 cm的土壤样品,土壤样品自然风干、磨细、过筛保存。土壤机械组成采用马尔文激光粒度分析仪测定;全氮采用半微量凯氏法测定;有效磷采用盐酸-硫酸溶液浸提法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定[16]。

### 1.4 数据分析

采用Margalef丰富度指数($M_a$)、Pielou均匀度指数($E_a$)、Shannon-Wiener多样性指数($H$)和Simpson多样性指数($D$)来表征不同微地形下植物多样性特征,各指数按下式计算[17]:

Margalef丰富度指数,反映群落中物种数量的指数[18]:

$$M_a = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

Pielou均匀度指数,反映了群落中各物种个体的分布情况,物种均匀度指数越高,说明各物种个体数量分布越均匀[18]:

$$E_a = H/\ln S \quad (2)$$

Shannon-Wiener多样性指数,群落中第$i$个物种的个体数量与群落中所有个体数量的比例,指数越高,群落的多样性越强[19]:

$$H = \sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Simpson多样性指数,表示在一个随机样本中出现两个相同物种个体的概率,$\sum P_i^2$越接近于0表示多样性无限,接近1表示无多样性,因此,$D$值越高,多样性越高[19]:

表1 立地因子划分及赋值

**Tab. 1 Site factor division and assignment**

| | | 立地因子 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$/(mg·kg$^{-1}$) | $X_5$/(g·kg$^{-1}$) | $X_6$/(mg·kg$^{-1}$) | $X_7$/mm | $X_8$/cm | $X_9$/% |
| 立地因子赋值 | 1 | 缓坡(<15°) | 下坡 | 阳 | 5~10 | <0.5 | <50 | 软质土(<10) | 极薄土(<10) | 5~10 |
| | 2 | 斜坡(15°~25°) | 中坡 | 半阴半阳 | 10~15 | 0.5~0.6 | 50~100 | 中质土(10~20) | 薄土(10~30) | 10~30 |
| | 3 | 陡坡(>25°) | 上坡 | 阴 | 15~20 | 0.6~0.7 | 100~150 | 硬质土(>20) | 中土(30~50) | >30 |
| | 4 | | | | >20 | >0.7 | 150~200 | | 厚土(>50) | |
| | 5 | | | | | | >200 | | | |

注:$X_1$为坡度,$X_2$为坡位,$X_3$为坡向,$X_4$为速效磷,$X_5$为全磷,$X_6$为速效钾,$X_7$为土壤硬度,$X_8$为土层厚度,$X_9$为土壤质地。下同。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \tag{4}$$

式中:$S$为样方中的物种总数,$N$表示样方所有物种的个体总数,$P_i$表示第$i$个物种所占的比例。

采用Microsoft Excel 2019进行数据处理,采用R 4.0.4 "psych"包、"corrplot"包、"NbClust"包及"agricolae"分别进行主成分分析、相关性分析、聚类分析和差异显著性分析,利用Origin 2021进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 立地类型的划分

将调查样地的9个指标数据进行数量化和标准化处理后,采用主成分分析方法,按特征值>1抽取,前3个主成分$F_1$、$F_2$、$F_3$的特征值>1,且代表了全部立地因子76.517%的信息,构建3个主成分与各因子关系式如下:

$$F_1 = 0.277X_1 + 0.356X_2 + 0.164X_3 - 0.379X_4 - 0.513X_5 - 0.393X_6 + 0.374X_7 + 0.205X_8 + 0.356X_9 \tag{5}$$

$$F_2 = 0.408X_1 - 0.404X_2 - 0.391X_3 + 0.327X_4 - 0.125X_7 + 0.331X_8 + 0.144X_9 \tag{6}$$

$$F_3 = 0.379X_1 + 0.13X_2 - 0.266X_3 - 0.155X_5 + 0.322X_6 + 0.513X_7 - 0.315X_8 - 0.443X_9 \tag{7}$$

从以上关系式可以看出,第一主成分代表土壤肥力状况(AP、TP、AK的系数>0.375),第二主成分代表地形特征(坡度、坡位、坡向的系数分别是0.408、-0.404、-0.391),第三主成分代表土壤物理性质(土壤硬度、土壤厚度、土壤颗粒组成的系数分别是0.513、-0.315、-0.443)。可见,土壤肥力状况在立地类型划分过程中起关键性主导作用,但土壤养分含量指标难以通过现场调查的方式直接测出,通过对立地因子的相关性分析可得(表2),土壤养分含量受地形因子影响,尤其与坡位显著相关($P<0.05$)。

结合立地因子的实地调查,采用相关性分析和主成分分析的方法,选取坡度,坡位和土壤硬度为废弃矿山立地类型划分的主导因子,主导因子分级标准见表1。针对3个主导因子,采用欧氏距离对调查样地进行聚类(图1)。聚类分析结果结合主导因

表2 立地因子的相关性分析结果

Tab. 2 Correlation analysis results of site factors

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 1.00 | | | | | | | | |
| $X_2$ | -0.08 | 1.00 | | | | | | | |
| $X_3$ | -0.33* | 0.18 | 1.00 | | | | | | |
| $X_4$ | 0.31 | -0.46* | -0.41* | 1.00 | | | | | |
| $X_5$ | -0.61** | -0.47** | -0.17 | 0.15 | 1.00 | | | | |
| $X_6$ | -0.15 | -0.43* | -0.16 | 0.23 | 0.47** | 1.00 | | | |
| $X_7$ | 0.46** | 0.64** | 0.05 | -0.35* | -0.63** | -0.07 | 1.00 | | |
| $X_8$ | -0.36* | -0.20 | 0.00 | 0.45** | 0.44** | -0.33 | 0.07 | 1.00 | |
| $X_9$ | 0.24 | 0.31 | 0.07 | 0.07 | -0.45** | -0.80** | 0.10 | 0.24 | 1.00 |

注:**表示在0.01水平上显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。

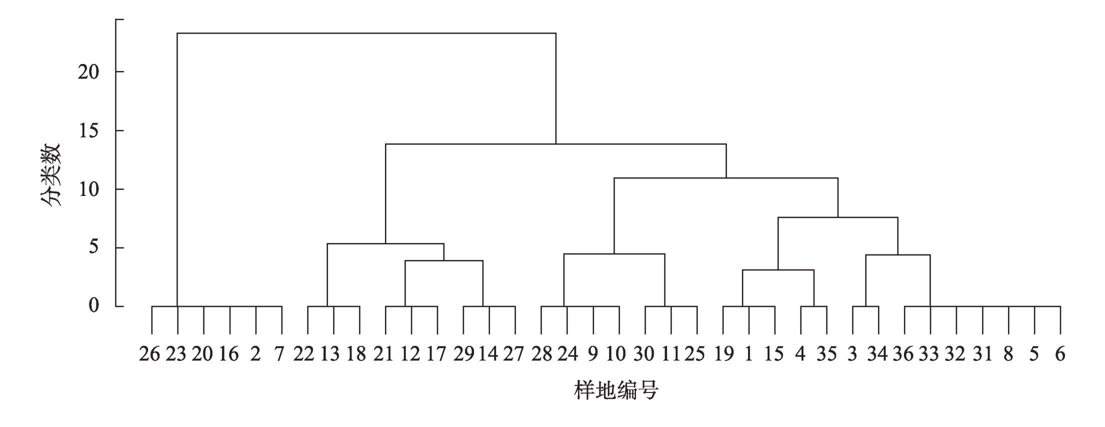



图1 聚类分析树状图

Fig. 1 Cluster analysis

子，将废弃矿山36个样地划分为3个立地类型组（缓坡立地类型组，斜坡立地类型组和陡坡立地类型组）和9个立地类型。立地类型包括缓坡坡下软质土立地类型、缓坡坡下硬质土立地类型、缓坡坡中中质土立地类型、缓坡坡中硬质土立地类型、缓坡坡上硬质土立地类型、斜坡坡中中质土立地类型、斜坡坡上硬质土立地类型、陡坡坡下硬质土立地类型、陡坡坡中硬质土立地类型。

### 2.2 不同立地类型的植物群落特征

总体来看，生物量和植被盖度呈现相同的趋势（图2），均呈现为缓坡坡中中质土立地类型（Ⅲ）>斜坡坡中中质土立地类型（Ⅵ）>缓坡坡下硬质土立地类型（Ⅱ）>缓坡坡中硬质土立地类型（Ⅳ）>陡坡坡下硬质土立地类型（Ⅷ）>缓坡坡上硬质土立地类型（Ⅴ）>缓坡坡下软质土立地类型（Ⅰ）>斜坡坡上硬质土立地类型（Ⅶ）>陡坡坡中硬质土立地类型（Ⅸ）。Ⅲ中生物量和植被盖度最高，分别为76.08 $g \cdot m^{-2}$和85.00%，植被盖度上显著高于Ⅶ和Ⅸ（$P<0.05$），生物量上显著高于Ⅰ、Ⅶ和Ⅸ（$P<0.05$）。Ⅸ的生物量和植被盖度最少，仅占Ⅲ生物量的25.59%，植被盖度的25.88%。

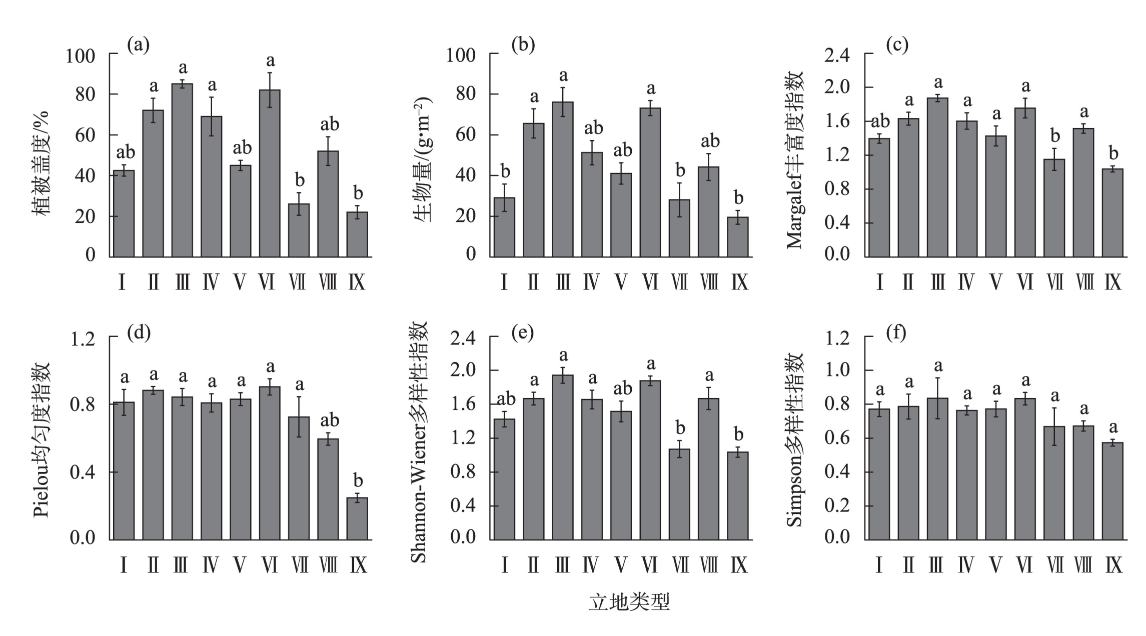
不同立地类型下植被Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数和Shannon-Wiener多样性指数的差异性显著（$P<0.05$），Simpson多样性指数差异不显著（图2）。其中Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数变化趋势与生物量和植被盖度趋势相同。Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数最高是Ⅲ，分别为1.87和1.94，其次是Ⅵ，Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数分别为1.76和1.88，Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数最少的是Ⅸ，仅为1.04和1.03。对于Pielou均匀度指数，Ⅸ显著低于其他类型，仅为0.25。

### 2.3 不同立地类型的近自然植被配置

为了配置植被达到近自然结构，统计不同立地类型出现的植被类型，并对计算多年生草本，一年生草本及灌木的比例，根据比例配置得到近自然的植被配置模式，根据表3可以看出，缓坡坡下软质土立地类型（Ⅰ）、缓坡坡上硬质土立地类型（Ⅴ）、陡坡坡中硬质土立地类型（Ⅸ）为纯草本模式，其余6种立地类型为灌草模式。

## 3 讨论

近自然恢复是以自然生态过程为主，辅以科学合理的人工管理措施，将退化生态系统恢复到生态服务功能（物种组成、多样性及群落结构）与地带性




注：Ⅰ为缓坡坡下软质土立地类型；Ⅱ为缓坡坡下硬质土立地类型；Ⅲ为缓坡坡中中质土立地类型；Ⅳ为缓坡坡中硬质土立地类型；Ⅴ为缓坡坡上硬质土立地类型；Ⅵ为斜坡坡中中质土立地类型；Ⅶ为斜坡坡上硬质土立地类型；Ⅷ为陡坡坡下硬质土立地类型；Ⅸ为陡坡坡中硬质土立地类型。不同小写字母表示不同立地类型在0.05水平上差异显著。下同。

图2　废弃矿山植物群落数量特征和物种多样性特征

Fig. 2　Characteristics of plant community quantity and species diversity in abandoned mines

表3 不同立地类型的植被配置及其比例

Tab. 3 Vegetation allocation and proportion of different site types

| 立地类型 | 物种数 | 植被配置模式 | 植被类型 | 所占比例/% |
|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | 7 | 草本 | 多年生草本 | 60 |
| | | | 一年生草本 | 40 |
| Ⅱ | 12 | 灌草 | 多年生草本 | 40 |
| | | | 一年生草本 | 40 |
| | | | 灌木或半灌木 | 20 |
| Ⅲ | 18 | 灌草 | 多年生草本 | 50 |
| | | | 一年生草本 | 40 |
| | | | 灌木或半灌木 | 10 |
| Ⅳ | 10 | 灌草 | 多年生草本 | 30 |
| | | | 一年生草本 | 50 |
| | | | 灌木或半灌木 | 20 |
| Ⅴ | 7 | 草本 | 多年生草本 | 90 |
| | | | 一年生草本 | 10 |
| Ⅵ | 13 | 灌草 | 多年生草本 | 70 |
| | | | 一年生草本 | 20 |
| | | | 灌木或半灌木 | 10 |
| Ⅶ | 6 | 灌草 | 多年生草本 | 70 |
| | | | 一年生草本 | 20 |
| | | | 灌木或半灌木 | 10 |
| Ⅷ | 9 | 灌草 | 多年生草本 | 40 |
| | | | 一年生草本 | 40 |
| | | | 灌木或半灌木 | 20 |
| Ⅸ | 4 | 草本 | 多年生草本 | 80 |
| | | | 一年生草本 | 20 |

注:Ⅰ为缓坡坡下软质土立地类型;Ⅱ为缓坡坡下硬质土立地类型;Ⅲ为缓坡坡中中质土立地类型;Ⅳ为缓坡坡中硬质土立地类型;Ⅴ为缓坡坡上硬质土立地类型;Ⅵ为斜坡坡中中质土立地类型;Ⅶ为斜坡坡上硬质土立地类型;Ⅷ为陡坡坡下硬质土立地类型;Ⅸ为陡坡坡中硬质土立地类型。

群落接近的生态系统,以实现生态系统结构和功能的多样性、稳定性和可持续性这一最终目标[12]。生境是植物群落形成的要素,不同生境所生长的植物种类也有所差异[6],本研究通过立地类型的划分对不同生境和生产力的土地进行科学分类和设计[20],利用主成分分析法筛选坡度、坡位和土壤硬度作为主导因子,这与杨宇平[21]、刘莹[22]在废弃矿山的研究结果相类似。因此,基于3个主导因子进行立地类型划分,将废弃矿山划分为3个立地类型组和9个立地类型,针对不同的立地类型运用统计学方法对植物种及其生长状况进行分析,结合适地适树原则,实现废弃矿区的近自然植被空间配置。

不同立地类型之间植被盖度和生物量具有显著差异(图2),立地类型的不同,地形和土壤性质的不同,形成了立地环境的空间异质性,这决定了天然植被的分布和生物多样性[17]。坡度对植被的影响主要体现在两个方面,一是在坡面水平方向上影响水养的流失[23],二是坡度的增大导致风力对土壤表面的侵蚀冲击力增加,加速土壤流失[24-25]。坡位的变化引起土壤水养含量的变化,主要表现在坡下>坡中>坡上[26-27]。有研究发现中质土最适宜种子的生长发芽,土壤过软或过硬都不利于植物生长[28]。在9种立地类型中仅缓坡坡下软质土立地类型、缓坡坡上硬质土立地类型、陡坡坡中硬质土立地类型,受到土质较软、坡上及坡陡养分含量较低的影响,这3种立地类型生境较差,难以支撑大量灌木的生长,近自然植被恢复中建议配置模式为草本模式(表3)。而其余立地类型,尤其是缓坡坡中中质土立地类型和斜坡坡中中质土立地类型,在中质土壤和缓坡条件下植被良好生长,近自然植被恢复中建

议为灌草模式(表3)。因此在生态环境脆弱,水土流失严重的地区,应结合立地类型进行近自然植被配置,形成健康的生态系统,使植物群落与自然环境相互适应,达到动态平衡,进而改善当地植被和环境条件[14]。

## 4 结 论

在乌拉特废弃矿山,影响植被生长与分布的主导立地因子是坡度、坡位和土壤硬度,据此可划分出9个立地类型。研究区内植被在缓坡、坡中且土壤硬度适中的立地类型水热条件相对较好,植被生长最优;而在陡坡、坡中、土壤硬度偏硬或土壤硬度偏软的立地类型生长相对较差,故而在进行近自然植被配置时可考虑不同立地类型的植被生长条件,如陡坡坡中硬质土立地类型建议配置模式为草本模式(配置比例为多年生草本:一年生草本=8:2),其余立地类型如缓坡坡中中质土立地类型建议配置灌草模式(配置比例为多年生草本:一年生草本:灌木或半灌木=5:4:1)。同时针对不同立地类型的水养条件可适当进行施肥灌溉,补充氮磷钾等生物复合肥以促进植被均匀分布快速建植。

## 参考文献(References):

[1] 魏远, 顾红波, 薛亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107–114. [Wei Yuan, Gu Hongbo, Xue Liang, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 107–114. ]

[2] 玉宝, 彭华福. 基于自然修复理念的森林经营措施研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(1): 8–17. [Yu Bao, Peng Huafu. Research on forest management measures based on natural restoration concept[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(1): 8–17. ]

[3] 白中科, 师学义, 周伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 1–9. [Bai Zhongke, Shi Xueyi, Zhou Wei, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. China Land Science, 2020, 34(9): 1–9. ]

[4] 安伟莉, 卢耀海, 谢威, 等. 基于近自然植被恢复的乔灌草种子混播研究[J]. 中国水土保持, 2021, 42(8): 40–43. [An Weili, Lu Yaohai, Xie Wei, et al. Mixed sowing of arbor, shrub and herbs seeds based on near natural vegetation restoration[J]. Soil and Water Conservation in China. 2021, 42(8): 40–43. ]

[5] Pensa M, Sellin A, Luud A, et al. An analysis of vegetation restoration on opencast oil shale mines in Estonia[J]. Restoration Ecology, 2004, 12(2): 200–206.

[6] Hodačová D, Prach K. Spoil heaps from brown coal mining: Technical reclamation versus spontaneous revegetation[J]. Restoration ecology, 2003, 11(3): 385–391.

[7] 白世强, 强真. 废弃露天矿山生态修复的问题与对策——以河南省南太行地区为例[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(7): 36–41. [Bai Shiqiang, Qiang Zhen. Problems and countermeasures of ecological rehabilitation of abandoned open- pit mines: A case study of South Taihang Region of Henan Province[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(7): 36–41. ]

[8] 徐文达. 建平县矿山生态重建与植被恢复存在的问题及解决策略[J]. 现代农业, 2020, 49(4): 87–88. [Xu Wenda. Problems and solutions of ecological reconstruction and vegetation restoration of mines in Jianping County[J]. Modern Agriculture, 2020, 49(4): 87–88. ]

[9] 唐玉凤, 李学艳, 程金朋, 等. 昭通龙树河流域废弃稻田湿地植物多样性及群落特征研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 1088–1095. [Tang Yufeng, Li Xueyan, Cheng Jinpeng, et al. Plant diversity and communities characteristics of abandoned paddy field wetland of Longshu River Basin in Zhaotong City[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(5): 1088–1095. ]

[10] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 等. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径[J]. 科学通报, 2020, 65(34): 3898–3908. [He Jinsheng, Bu Haiyan, Hu Xiaowen, et al. Close-to-nature restoration of degraded alpine grasslands: Theoretical basis and technical approach[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(34): 3898–3908. ]

[11] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 等. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式群落特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 50–55. [Peng Donghai, Hou Xiaolong, He Zongming, et al. Community characteristics of different vegetation restoration models in gold tailing wasteland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 50–55. ]

[12] 韦易伶. 山地生态公园近自然植物配置模式初探[J]. 现代园艺, 2021, 44(22): 182–183, 186. [Wei Yiling. A Preliminary study on the pattern of near-nature plant allocation in mountain ecological park[J]. Contemporary Horticulture, 2021, 44(22): 182–183, 186. ]

[13] 宋安琪, 季心蕙, 赵兵. 基于生态修复理论的长江岸线林带景观营造——以扬州市江都经济开发区沿江区域林带景观规划设计为例[J]. 园林, 2020, 40(3): 71–75. [Song Anqi, Ji Xinhui, Zhao Bing. The landscape construction of the forest belt along the Yangtze River bank based on ecological restoration theory: Take the forest belt landscape planningalong Yangzhou Jiangdu economic development zone riverside as an example[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2020, 40(3): 71–75. ]

[14] 王赛峰, 赵一凡, 乌兰, 等. 乌拉特前旗植被分布特点与保护[J]. 内蒙古林业调查设计, 2006, 46(5): 49–52. [Wang Saifeng, Zhao Yifan, Wu Lan, et al. Vegetation distribution and protection of Urat Front Banner[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2006, 46(5): 49–52. ]

[15] 戴礼飞. 基于GIS和RUSLE的乌拉山区小流域综合治理[D]. 北

京: 北京林业大学, 2013. [Dai Lifei. Comprehensive Treatment of the Watershed in Wula Mountains Based on GIS and RUSLE[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. ]

[16] Zhang Hengshuo, Yu Yang, Zha Tonggang, et al. Assessing previous land-vegetation productivity relationships on mountainous areas hosting coming Winter Olympics Games in 2022[J]. Science of The Total Environment, 2021, 788: 147870.

[17] 明健. 平山片麻岩微立地划分、植被特征及植物配置研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [Ming Jian. Study on Micro-site Division, Vegetation Characteristics and Optimal Allocation of Pingshan Gneiss[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. ]

[18] Cui Ranran, Qi Shi, Wu Bingchen, et al. The influence of stand structure on understory herbaceous plants species diversity of Platycladus orientalis plantations in Beijing, China[J]. Forests, 2022, 13(11): 1921.

[19] Aleksandra Glowacka, Ewelina Flis-olszewska. The biodiversity of weed communities of dent maize, narrow-leaved lupin and oat in relation to cropping system and weed control[J]. Annales Umcs Agricultura, 2022, 77: 3.

[20] 袁雪丽, 汪阳东, 黄兴召, 等. 基于数量化理论对山苍子立地类型划分及评价[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 91–96. [Yuan Xueli, Wang Yangdong, Huang Xingzhao, et al. Classification and evaluation of *Litsea cubeba* site type based on quantification theory [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 91–96. ]

[21] 杨宇平. 灵武矿区采煤迹地立地类型划分及其特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [Yang Yuping. Study on Site Classification and Characteristics of Coal Mining Bases in Lingwu Mining Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. ]

[22] 刘莹. 乌海煤矿区排土场立地类型划分及其质量评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [Liu Ying. Study on Site Classification and Evaluation of Dump in Wuhai Coal Mining Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. ]

[23] 赵鹏, 屈建军, 徐先英, 等. 长江源区沙化高寒草地植被群落特征及其与地形因子的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1030–1040. [Zhao Peng, Qu Jianjun, Xu Xianying, et al. Study on the characteristics of sandy alpine grasslands and its relationship between plant distribution and microtopography in the source regions of Yangtze River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 1030–1040. ]

[24] 和继军, 唐泽军, 蔡强国. 内蒙古农牧交错区农耕地土壤风蚀规律的风洞试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 35–39. [He Jijun, Tang Zejun, Cai Qiangguo. Study on changing laws of soil wind erosion by wind tunnel experiment in Agro-pastoral area of Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 35–39. ]

[25] 赵蒙恩, 闫庆武, 刘政婷, 等. 鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1819–1831. [Zhao Mengen, Yan Qingwu, Liu Zhengting, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1819–1831. ]

[26] 王君立. 坡度坡位对植烟土壤有机碳氮形态及团聚体组成的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2019. [Wang Junli. Effects of Slope Gradient and Position on Organic Carbon and Nitrogen Fractions and Aggregate Composition in Tobacco-growing Soil[D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2019. ]

[27] 尉迟文思, 苗恒录, 王星天, 等. 阴山北麓荒漠草原干旱气象因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 327–1334. [Yuchi Wensi, Miao Henglu, Wang Xingtian, et al. Analysis of meteorological factors affecting drought in a desert steppe of the northern foot of Yinshan Mountain[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 327–1334. ]

[28] 冯丹. 鲁中南干旱瘠薄山地立地因子空间变异性及微立地划分[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021. [Feng Dan. Spatial Variability of Site Factors and Micro Site Classification in Arid and Barren Mountains of South Central Shandong Province[D]. Tai'an: Shandong Agriculture University, 2021. ]

# Spatial allocation pattern of near-natural vegetation for ecological restoration of abandoned mines in the Wula Mountains

ZHANG Zeyu[1], WU Xiaojing[2], LIANG Yipeng[1], ZHANG Xiaoxia[3], ZHA Tonggang[1,4]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Badaling Forest Farm, Beijing 102112, China; 3. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China; 4. Jixian County National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This study addresses the insufficient trade-offs between regional vegetation diversity and topographic differentiation during restoring vegetation processes in abandoned mines. Based on the basic principles of near-natural restoration, this study examines the primary factors determining a classification of different site types, clarifies the spatial distribution patterns of vegetation and near-natural vegetation configuration modes under various site types, and establishes a foundation for near-natural vegetation configuration for ecological restoration in abandoned mine areas. It is crucial to understand the features of the plant communities of various site types for the selection and allocation of species during the restoration of ecological services in abandoned mines. Herein, we employed field investigation and indoor analysis as our study methodologies, situated within abandoned mines of Inner Mongolia's Wula Mountains. Using principal component, correlation, and cluster analyses, we chose nine indicators, including topographic features and soil properties (slope, slope position, slope direction, available phosphorus, total phosphorus, available potassium content, soil hardness, soil thickness, and soil texture), to identify the dominant site types. The variations in plant community traits (e.g., biomass and diversity) among different site types were then compared. Based on correlation analysis and principal component analysis, the results indicated that slope, slope location, and soil hardness were the key characteristics for classifying different types of sites. The research region was classified into three site type groups and nine site types. The biomass, vegetation coverage, Margalef richness index, and Shannon-Wiener diversity index are greater for the gentle-middle slope-medium hard soil site type, slope-middle slope-medium hard soil site type, and lower for the steep-middle slope-hard soil site type than for other site types. This is because of the variations in moisture, nutritional, and light conditions across the site types owing to topographic influences. In comparison to moderate slopes, steep slopes are more vulnerable to soil erosion caused by gravity and wind, as well as moisture and nutrient loss. Nutrient conditions are better at the downhill than in and on the slope due to the change in slope position. Additionally, too soft or too hard soil does not support the plants' development. Consequently, the biomass and diversity of various site types on abandoned mining sites vary. Therefore, we must consider the effect of site conditions and create the spatial layout of vegetation according to distinct site types when creating near-natural vegetation for mine ecological restoration. We advise the herbaceous mode for poorer habitat types, such as the steep-middle slope-hard soil site type (with a configuration ratio of perennial herb∶annual herb = 4∶1). We recommend the irrigation and grass mode for better-maintained areas. Examples of these site types include gentle-middle slope-medium hard soil (with a configuration ratio of perennial herb∶annual herb∶shrub or semi-shrub = 5∶4∶1) and slope-middle slope-medium hard soil (with a configuration ratio of perennial herb: annual herb: shrub or semi-shrub = 7∶2∶1).

**Keywords:** abandoned mine; site type; principal component analysis; cluster analysis; characteristics of vegetation community